CONDUTIVIDADE TÉRMICA (K)

Condução térmica – fenômeno segundo o qual o calor é transmitido das regiões de alta temperatura para regiões de baixa temperatura em uma substância.

K - Habilidade de um material em transferir calor

Fluxo de calor através de uma área do material dependerá do gradiente térmico ao longo do caminho

T_1 A T_0 $T_1 > T_0$ x

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)\left(\frac{1}{A}\right) = -K\left(\frac{dT}{dx}\right)$$

fluxo de calor por unidade de tempo e por unidade de área

A – área perpendicular à direção do escoamento;
dT/dx – gradiente de temperatura
K – condutividade térmica (cal/s ºC cm) (W/mK)

K – propriedade intrínseca do material
T, t, A, x – variáveis dependentes das condições de operação e geometria

Nos sólidos, transferência de calor ocorre por dois mecanismos:

- **1. pelo movimento de elétrons livres no sólido**
- **2. pela vibração de átomos na rede (fônons)**

Nos metais: 1 > 2

- **Bons condutores de calor, pois existem número relativamente grande de elétrons livres que participam da condução**
- **Elétrons livres possuem considerável quantidade de energia por unidade de volume, alta velocidade e um razoável caminho livre médio**
- **Contribuição eletrônica é elevada**

Em semicondutores

- As duas contribuições são comparáveis

Em isolantes

- Não há elétrons livres

Em cerâmicas:

3 mecanismos:

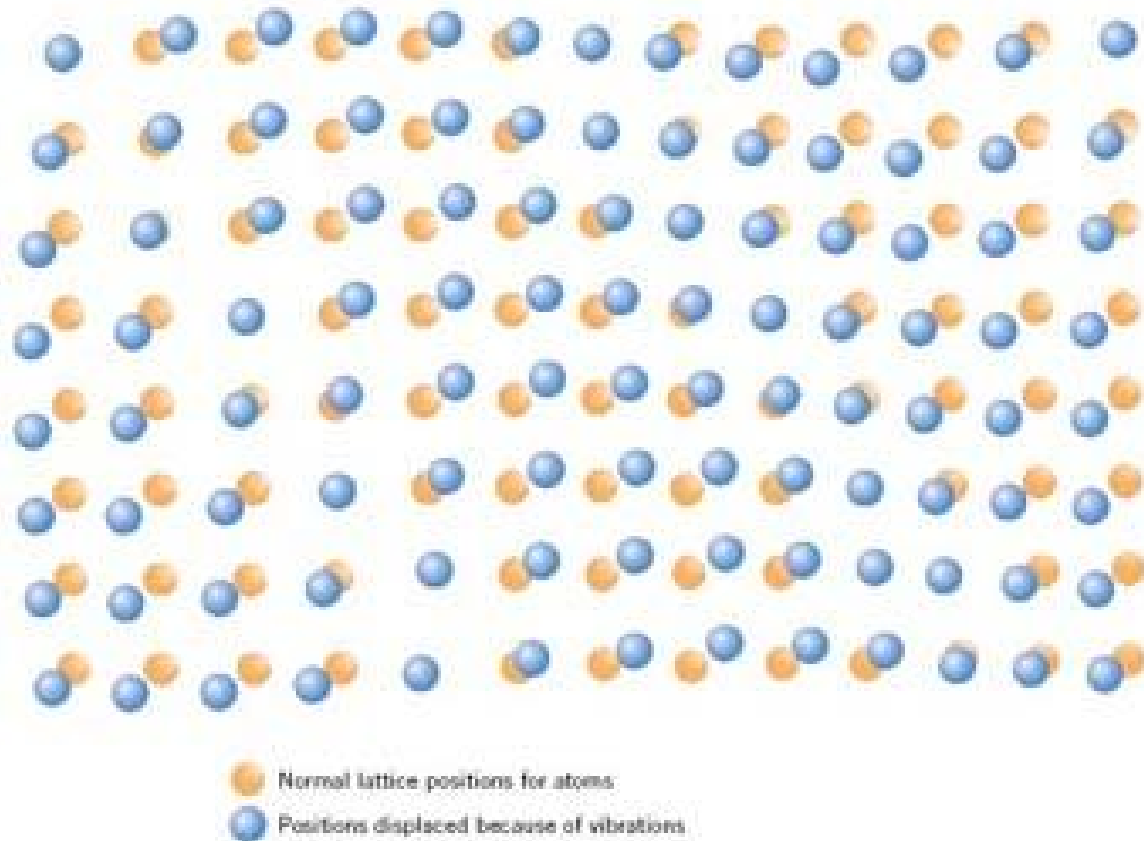
- Fônons
- Fótons (fases cerâmicas são transparentes à energia radiante)
- Transmissão por convecção nos poros do material

Material	k (W/m-K)	Energy Transfer
• **Metals**		
Aluminum	247	By vibration of atoms and motion of electrons
Steel	52	
Tungsten	178	
Gold	315	
• **Ceramics**		
Magnesia (MgO)	38	By vibration of atoms
Alumina (Al_2O_3)	39	
Soda-lime glass	1.7	
Silica (cryst. SiO_2)	1.4	
• **Polymers**		
Polypropylene	0.12	By vibration/ rotation of chain molecules
Polyethylene	0.46-0.50	
Polystyrene	0.13	
Teflon	0.25	

increasing k

Condutividade por fônons

Energia vibracional que origina uma propagação harmônica de ondas elásticas por um meio contínuo.

Fônons – são ondas que caminham pelo sólido com a velocidade do som e possuem um livre caminho médio

Condutividade térmica para sistemas monofásicos pode ser expressa por:

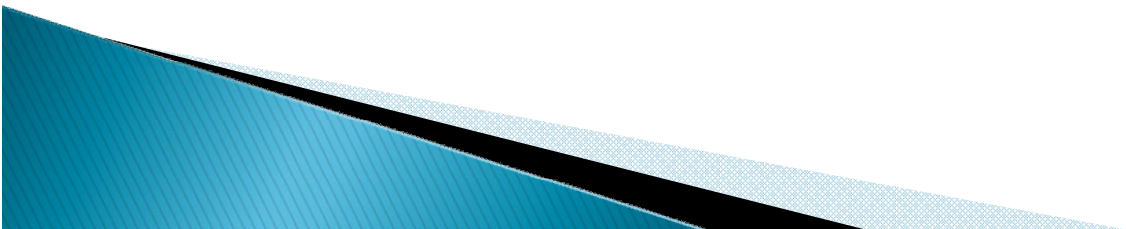
$$K = \frac{1}{3} c.v.\bar{l}$$

c – calor específico volumétrico (cal/^{o}C.cm^{3})

v – velocidade de propagação da onda elástica (cm/s)

l - caminho livre médio entre suas colisões (cm)

Para cerâmicas cristalinas, a condutividade por fônons depende:

- Temperatura
- estrutura do material
- presença de impurezas, soluções sólidas, etc.

- **Para baixas temperaturas** – interação fônon-fônon é pequena – maior fonte de espalhamento são os defeitos da rede

$$K = \frac{1}{3} c . v . \bar{l}$$

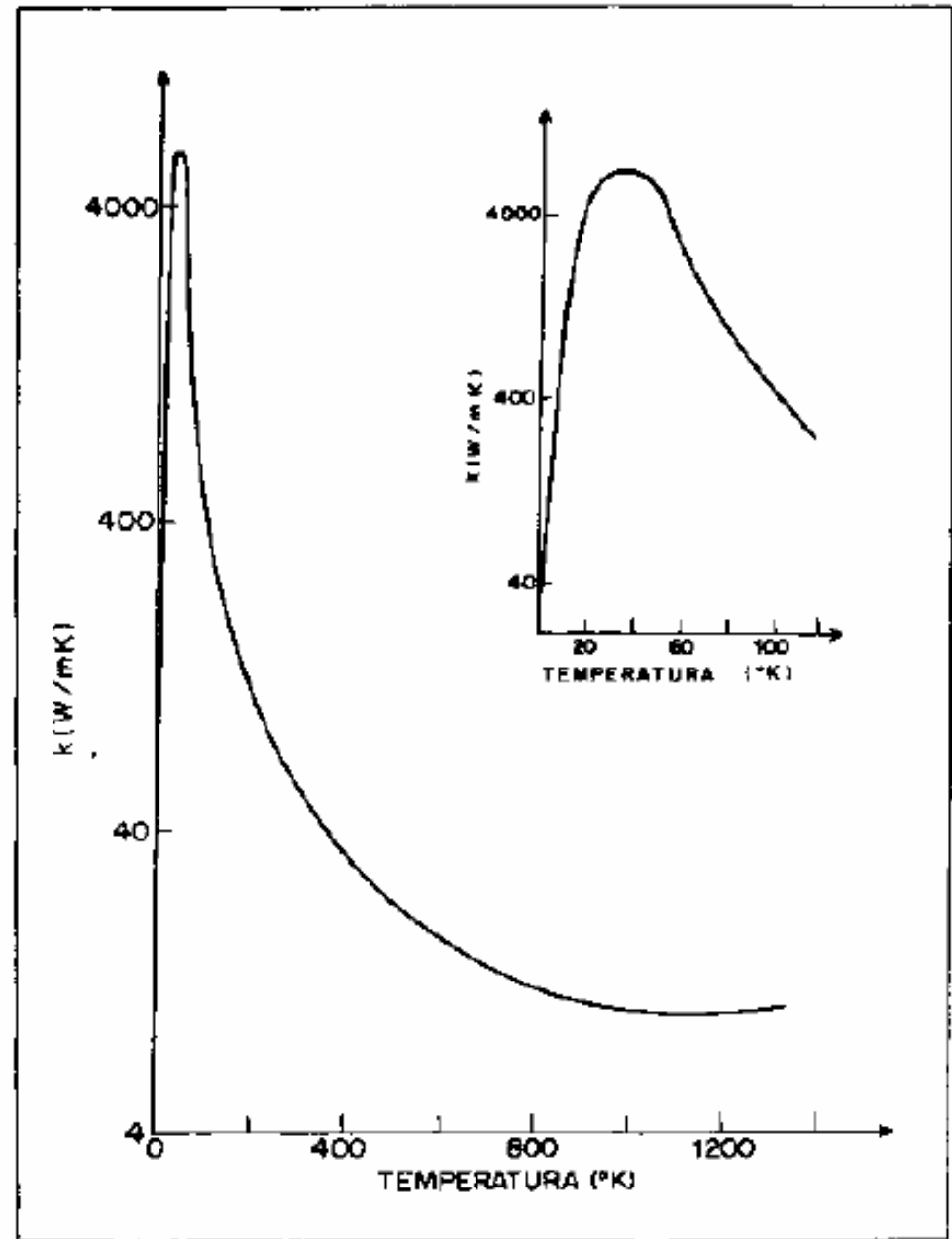



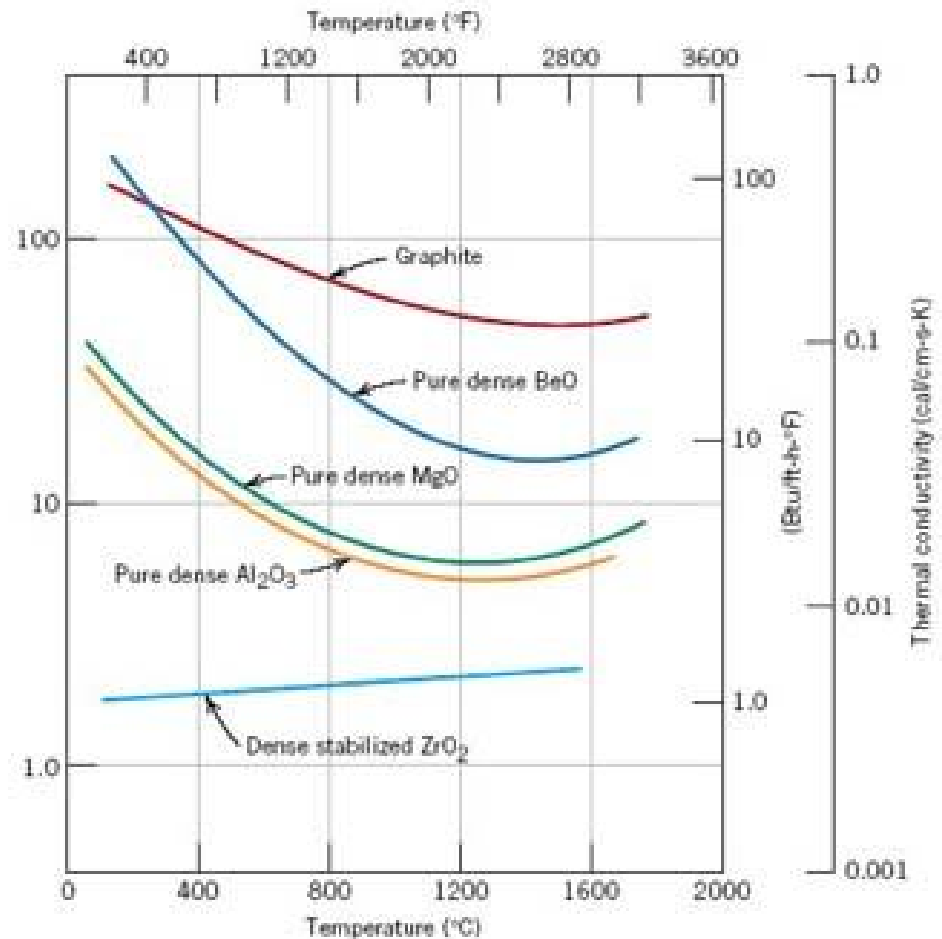
Figura 1.1. Condutividade térmica para um cristal simples de óxido de alumínio.

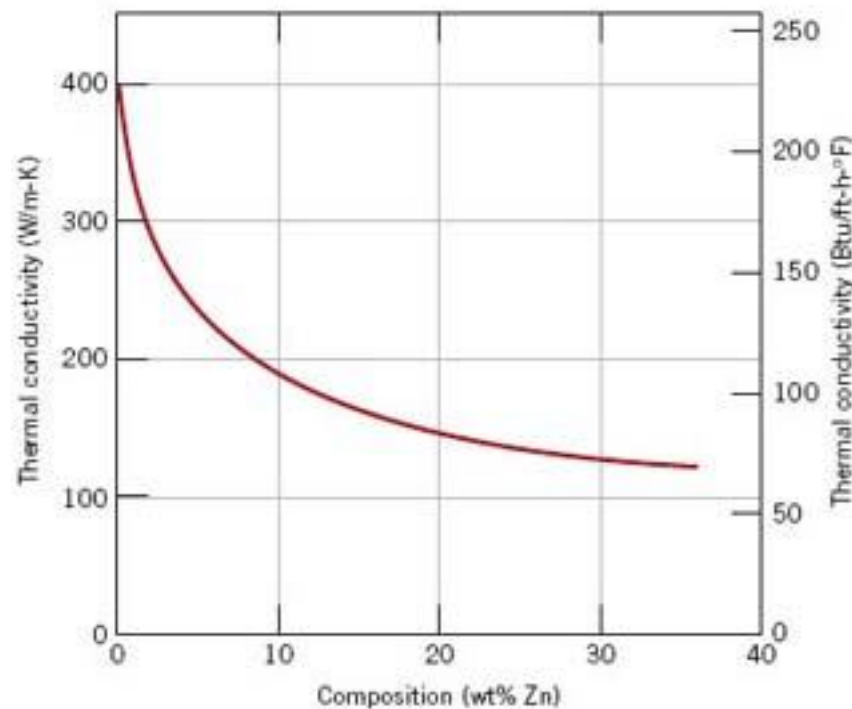
Temperatura

Caminho livre médio – l

- Especifica a distância média entre as colisões de fônons;
- Diminui com o aumento de temperatura

Com o aumento de temperatura:

- Geração de fônons aumenta linearmente
- Há diminuição em seu livre caminho médio
- Interação fônons-fônons provoca espalhamento
- Condutividade térmica normalmente decresce quando a temperatura se eleva
- Para altas temperaturas – l diminui para ordem de poucos Angstroms – seu valor torna-se independente da temperatura

Impurezas e solução sólida

- Causam a diminuição da condutividade térmica por fônons – diminuição de l
- Regularidade da rede cristalina é alterada e os fônons sofrem maior espalhamento
- Efeito desprezível para temperaturas acima da temperatura de Debye, pois os l são da ordem dos parâmetros de rede.

Estrutura cristalina

- Materiais com estruturas complexas – maior tendência ao espalhamento

Ex: espinélio $MgAl_2O_4$ possui condutividade térmica menor que a da Al_2O_3 e MgO isoladamente.

- Cristais anisotrópicos – condutividade varia coma direção do cristal

Ex: grafite (K é maior nas direções com menores α)

Estrutura cristalina – acarreta menor interferência sobre o movimento dos fônons em relação aos vidros

Vidros

- Desordem cristalina limita o caminho livre médio dos fônons a dimensões próximas à distância interatômica
- Vidros apresentam uma menor condutividade térmica que os cristais (excluindo os efeitos da condutividade por radiação).
- Condutividade independe de l, mas depende totalmente do calor específico desses materiais.

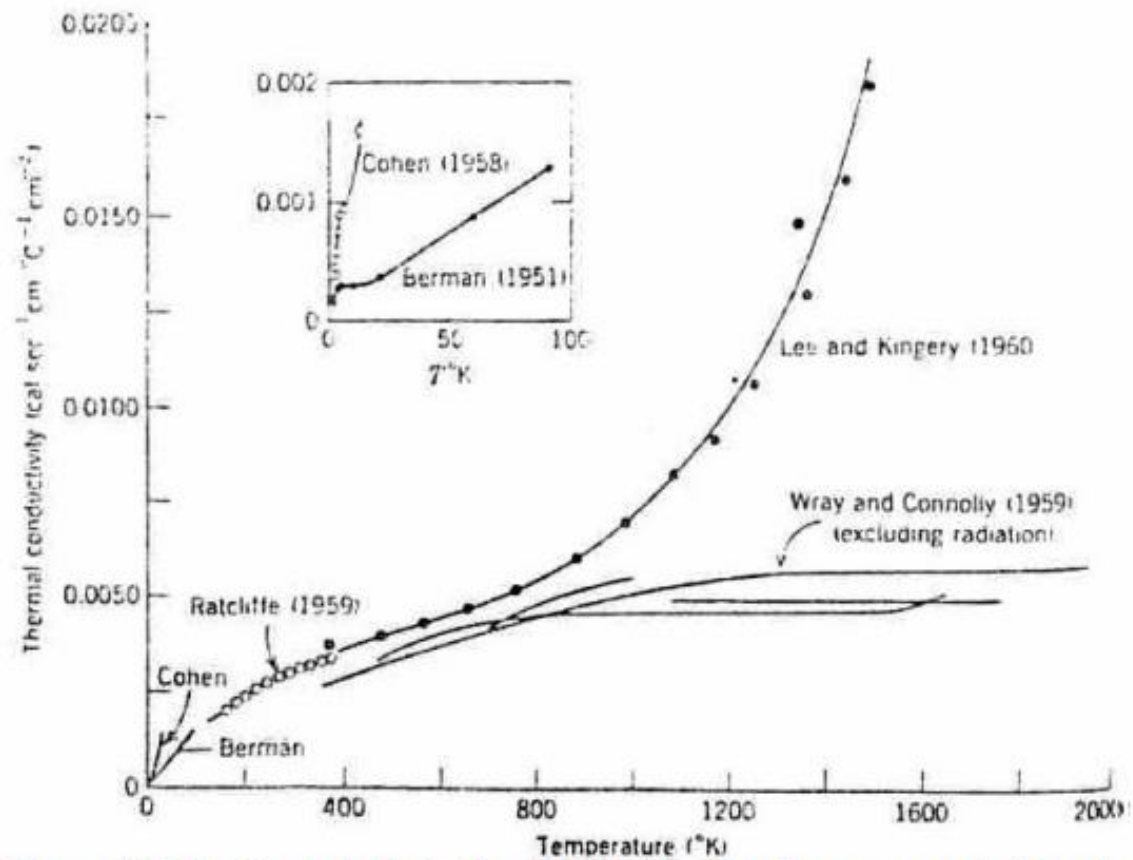



Figura 13.17 - Condutividade térmica da sílica fundida para ampla faixa de temperaturas.

Quando a condutividade por fônons é excluída, a condutividade permanece praticamente constante para temperaturas acima de 800 K, no caso do SiO_2 (amorfo)

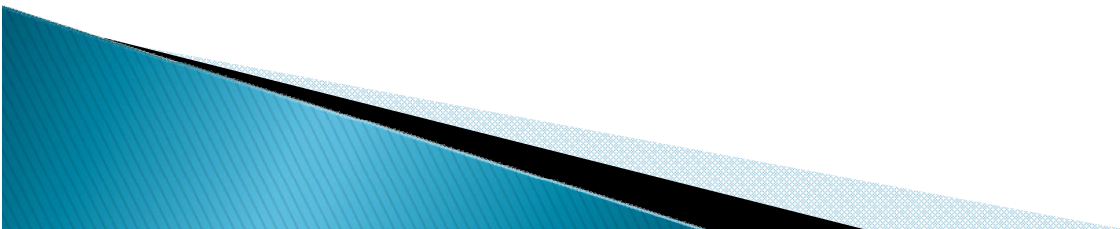
Metais – para metais puros, as vibrações da rede também dependem do seu peso atômico

Em geral: elementos de menor peso atômico apresentam maior condutividade térmica para uma mesma temperatura

Uma estrutura bem empacotada constituída por átomos leves apresenta alta condutividade

Ex: entre 30 e 300K – diamante conduz melhor que a prata

K_D = 1,54 cal/cm.s.K

K_{Ag} = 1,02 cal/cm.s.K

Condutividade por fótons

- Transferência de energia é efetuada através de ondas eletromagnéticas - *radiação térmica* (calor radiante infravermelho)
- Negligenciado a baixas e médias temperaturas, devido a sua baixa contribuição a energia total.
- Importante a altas temperaturas

Condutividade térmica por energia radiante (Kr) pode ser expressa por:

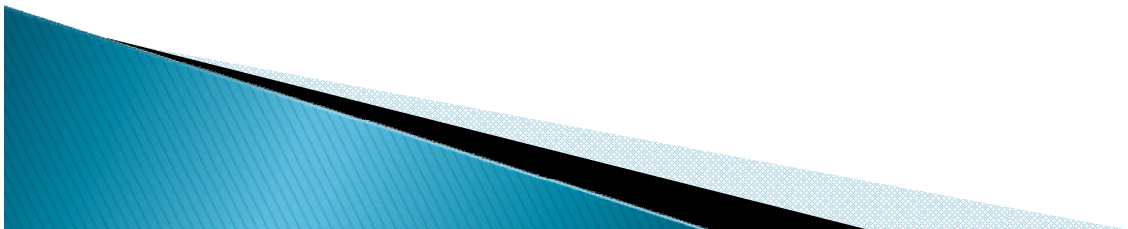
$$K_r = \frac{16}{3}\sigma n^2 T^3 l_r$$

Onde

σ – cte de Stefan-Boltzmann (1,37 x 10-12 cal/cm^{2}sK)

n – índice de refração

T – temperatura

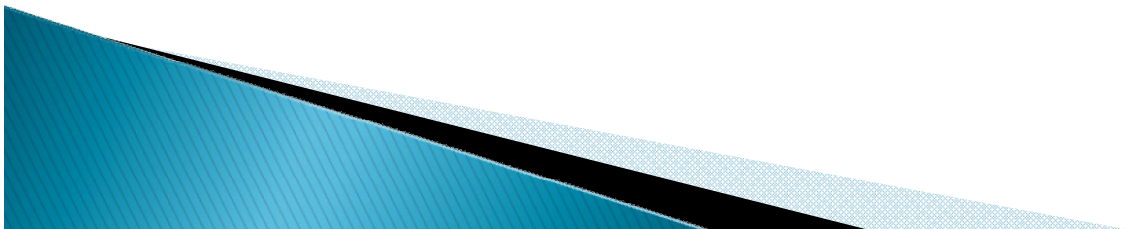
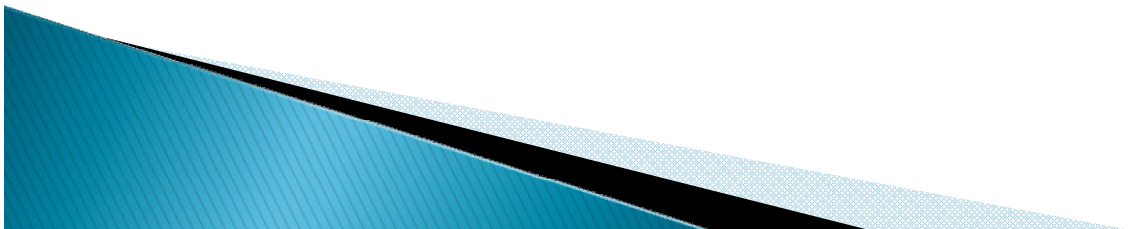
lr – caminho livre médio da energia radiante

K_r depende de l_r

- Para materiais opacos - l_r ~0 energia transferida é desprezível

  Ex: metais

- Nos materiais cerâmicos – espalhamento da luz, causado principalmente pelos poros.

↓

Grande diferença no índice de refração entre os poros e a parte sólida e o tamanho e a quantidade de poros presentes reduzem significativamente a transmissão de energia para porosidades superiores a 0,5%.

- A absorção e o espalhamento dos fótons no visível e nas regiões do infravermelho são características básicas para a condutividade por fóton.
  - Para materiais com baixos coeficientes de absorção – condutividade por fóton torna-se importante a baixas temperaturas
  - Para materiais com altos coeficientes de absorção – condutividade por fóton torna-se importante a altas temperaturas
  - Para vidros e monocristais – boa transmissão no visível e no infravermelho
    - Quanto maior a temperatura maior a condutividade térmica por fótons
- Para a maioria das cerâmicas sempre há alguma porosidade – a transmissão de energia é marcadamente reduzida
  - l é menor que em vidros e monocristais

Porosidade

$$K_r = 4d_p n^2 \sigma e T^3$$

- d_p – maior dimensão do poro na direção do fluxo de calor
- e – emissividade das paredes do poro (capacidade de um material emitir calor, expressa pela porcentagem de emissão em relação ao corpo negro, que é considerado um radiador ideal)

  - ✓ Poros maiores contribuem com o aumento da condutividade a altas temperaturas
  - ✓ Poros menores (e de caráter fechado) são barreiras eficientes ao fluxo de calor, portanto o tipo de poro desejável nos refratários isolantes

  Ex: poros com dimensões de 3 mm perdem todo o potencial isolante a T>700ºC.

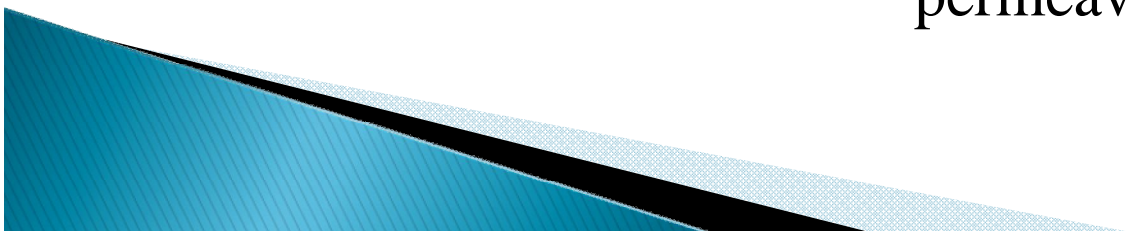
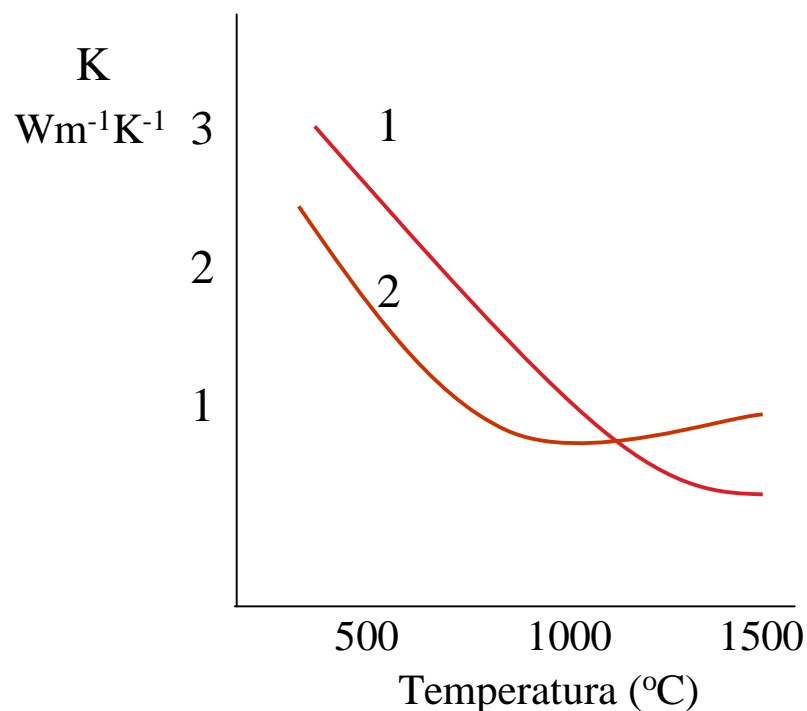
  Poros com dimensões menores que 0,5 µm mantém o poder de isolamento até 2000ºC.

Condutividade térmica via convecção

- Refratários estruturais densos – 10-25% porosidade residual
- Refratários estruturais isolantes – 45 a 65% de porosidade residual

Porosidade de natureza aberta e interconectada

Poros cheios de gás

A conexão dos poros permite a passagem de gases, que por convecção, causam um aumento da K nos tijolos permeáveis.

Dependência das curvas de condutividade térmica com a microestrutura de dois tijolos isolantes aluminosos

Tijolo 1 – 80% dos poros possuem diâmetro entre 2 e 3 um

Tijolo 2 – 40 % dos poros existentes estão acima de 100 um e a quantidade de poros abaixo de 2 um é desprezível

	Densidade aparente (g/cm^3)	Porosidade Aparente (%)	Porosidade (%)	Resistência a compressão (kg/cm^2)
1	**1,59**	**55**	**60**	**1240**
2	**1,35**	**63**	**66**	**110**

Influência da presença de mais de uma fase na condutividade térmica

- Fases paralelas: **Km=V1K1+V2K2**
  - A condutividade se aproxima do melhor condutor entre as fases
- Fases perpendiculares:
  Km=K1K2/V1K1+V2K2
  - A condutividade se aproxima da condutividade da fase menos condutora (cerâmicos com camada superficial)
- Fase dispersa: (muito comum em cerâmicos)
  - **Km=Kc{1+2Vd(1-Kc/Kd)/(2Kc/Kd+1) / 1-Vd(1-Kc/Kd)/(Kc/Kd+1)}**
  - A condutividade se aproxima da cond. da fase contínua

- K1 cond. Fase 1; K2 cond. Fase 2 ; V1 e V2 Fração de vol. das fases ; Kc cond.da fase contínua ; Kd cond. da fase dispersa ; Vd vol. da fase dispersa

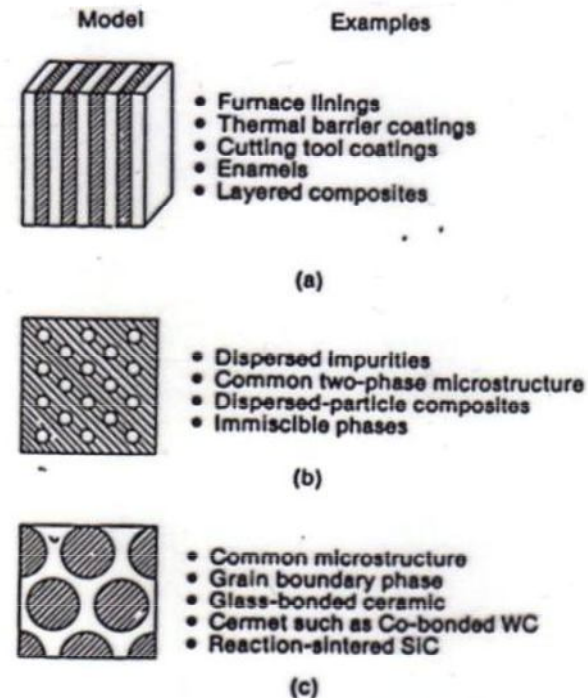



Figure 4.8 Several models for distribution of two phases in a material: (a) Pa slabs, (b) continuous matrix phase, discontinuous particulate dispersion, an large isolated grains separated by a continuous minor phase. (© ASM Internatio

Propriedades termomecânicas

Tensões térmicas - quando variações de temperatura provocam alterações dimensionais não-uniformes, as deformações resultantes causam tensões internas no material

- São mais significativas nos materiais cerâmicos do que nos metais devido à ausência de ductilidade.

Causas das variações dimensionais não-uniformes:

1. Transformação de fase

Ex: quartzo

2. Dilatações diferenciais – diferentes fases

Ex: porcelana

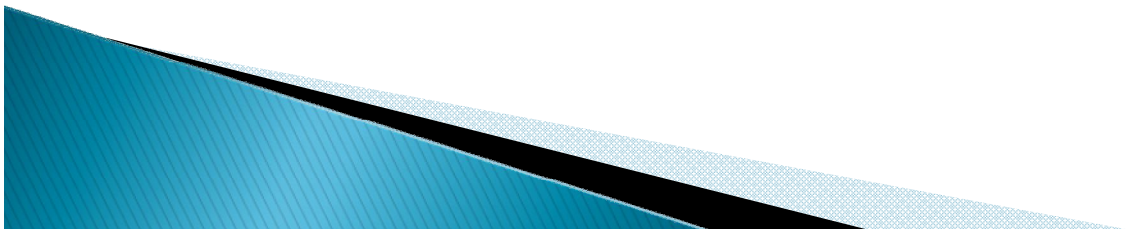
3. Dilatações anisotrópicas dos cristais em uma cerâmica policristalina

4. Choque térmico – devido a condutividade térmica finita nos materiais, não permite o equilíbrio da T pelo corpo, gerando tensões.

Termoclase (spalling) – utilizada para situações onde há ocorrência de dano em materiais refratários

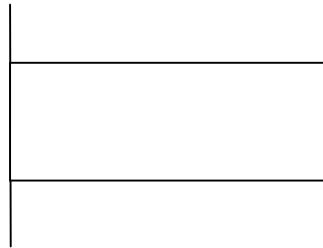
- termoclase térmica – associada às variações bruscas de temperatura

- termoclase mecânica – associada à compressão excessiva em estrutura de refratários

- termoclase estrutural – causada pelas transformações ou formação de novas fases no refratário

Tensões térmicas

- Supondo uma seção cilíndrica, aquecida a uma temperatura T:

$\sigma = E. \varepsilon$

$\sigma = E. \Delta L/Lo$

Como: $\alpha = (\Delta L/Lo)\ (1/\Delta T)$

$\boldsymbol{\sigma = E. \alpha \Delta T}$

Ex: Al_2O_3

$E = 400GPa$

$\alpha = 8 \times 10$-6 oC-1

$\Delta T = 1000^{o}C$

$\sigma = 3,2$ GPa

Porém $\sigma f = 400MPa$